

<논 문>

## 암석폐재의 고화체 합성기술의 개발과 파괴인성평가에 관한 연구

나의균\* · 유호선\*\* · 김진용\*\*\* · 이종기\*\*\*\* · 정세희\*\*

(1997년 2월 25일 접수)

### Study on Technique Development for the Solidified Body of Rock Waste and Evaluation of Fracture Toughness

Eui Gyun Na, Hyosun Yu, Jin Yong Kim, Jeong Gee Lee and Se Hi Chung

**Key Words :** Hydrothermal Hot Press(수열 열간압착), Rock Waste(암석폐기물), Solidified Rocks(고화체), Strength(강도), Fracture Toughness(파괴인성), Crack Opening Displacement(균열개구변위), Fiber Volume Fraction(섬유체적함유율), Bridge's Effect(교량효과), Multiple Cracking(다중균열), Matrix(기지), Shear Strength(전단강도)

#### Abstract

The hot press apparatus to obtain the solidified rocks with 60mm of diameter against rock waste was developed, and the optimum conditions for solidification were founded out, of which were 300°C of temperature and 1hr of holding time. The solidified rocks reinforced with the fibers (carbon, steel) were made by means of a hydrothermal hot press method. Fracture toughness of those was obtained using the round compact tension(RCT) specimens. Load and displacement behaviours of the solidified rocks reinforced with the fibers were dependent upon the fiber volume fraction and kind of the fibers. Strength and fracture energy of the solidified rocks with steel were much larger than those of the solidified ones with carbon because of the Bridge's effect, multiple cracking and crack branching phenomena.

#### 1. 서 론

석재공장에서 각종 암석을 가공할 때, 불연소성 암석폐기물이 많이 발생하게 된다. 원래 암석폐기물은 일정 구역에 매립하도록 되어 있으나, 여러 가지 사정에 의해 매립지를 구하지 못하고 있는 실

정이며, 이로 인해 석재공장 주변의 환경이 크게 오염되고 있다.

따라서 암석폐기물과 같은 환경오염원을 제거하여 쾌적한 환경을 보호하기 위해서는 암석폐기물을 제 2의 자원으로 적극적으 재할용할 필요가 있으며, 이를 위한 기술의 개발이 요구되는 실정이다.

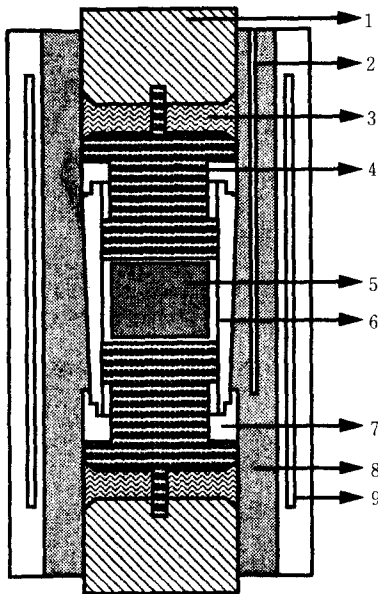
본 연구에서는 우선 무기분말을 고형화 합성시키는 장치를 개발하고, 이어 분말형태의 각섬석 폐기물을 고형화시켜서 고강도 고화체 합성을 위한 최적조건을 찾아내어 암석폐기물의 고화체 제조기술

\*회원, 군산대학교 기계공학부

\*\*회원, 전북대학교 기계공학부

\*\*\*회원, 전북대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*\*회원, 전북산업대학교 기계공학과



1. Push rod
2. Thermocouple
3. Grand packing made by Teflon
4. Cast rod
5. Specimen
6. Sample housing
7. Space for water retreat
8. Inner pressure tube
9. Outer tube for heater

Fig. 1 Cross section view for hydrothermal hot pressing apparatus

을 확립하고자 한다.

한편, 얻어진 고화체를 산업분야에서 재활용하기 위해서는 인성을 갖고 있어야 한다. 왜냐하면 취성적인 성질을 갖는 고화체를 건축용 패널과 같은 건축재료든가, 구조용 재료로서 사용하기 위해서는 충격적이거나 외적인 하중을 받을 때 어느 정도의 변형능력을 갖추고 있어야 하기 때문이다. 종래 Liu 등의 연구에 의하면<sup>(1,2)</sup> 세라믹 취성재료에 적정한 단섬유를 복합시킴으로써 연성재료와 같은 파괴거동을 보인다는 사실을 이론적으로 증명하였고, 세라믹과 같은 취성재료에 단섬유를 복합시킴으로써 인성이 개선된다는 연구결과도 보고한 바 있다.

이와 같은 배경하에 고화체에 단섬유를 복합시켜 어느 정도의 인성을 갖는 새로운 개념의 복합재료를 제조하고, 이어 제조된 고화체에 대해 강도 및 파괴인성을 평가하고자 한다. 아울러 주사전자현미

경에 의해 고화기구와 고화체의 미시적 파괴기구를 규명하여 암석폐재에 단섬유를 혼입시킨 섬유강화 복합재료의 제조기술을 확립하고자 한다.

## 2. 실험절차

### 2.1 수열 Hot press 장치의 개발

본 연구에서 사용된 수열 hot press 장치는 직경이 60 mm이고, 온도를 400°C까지 올릴 수 있는 autoclave로서 자체적으로 설계, 제작하였다. 본 장치의 특징은 Fig. 1에서 볼수 있는 바와 같이, 안쪽에 위치하는 통(inner pressure tube)에 약간의 테이퍼를 주었다는 점이다. 장치를 구성하고 있는 부재(SM재)들의 치수가 다르기 때문에 부재사이의 열팽창량이 다르고, 이에 따라 냉각되는 과정에서 Sample housing이 관의 내벽에 강하게 밀착되기 때문에 장치로부터 sample housing이 용이하게 빠지도록 하기 위해서는 테이퍼를 주는 것이 절대적으로 필요하다. 또한, sample housing으로부터 고화체를 빼내는 과정에서 고화체와 housing 사이의 마찰력에 의해 발생하는 housing 내벽의 마모량을 줄이기 위하여 sample housing을 대상으로 질화처리를 실시하였다. 아울러 수열실험동안 시료로부터 압착되어 나오는 고압증기가 머물도록 하기 위한 공간은 cast rod에 홈을 가공하여 확보하였으며, 이 공간은 수열실험동안 시료중의 수분을 조절하기 때문에 암석폐재가 고화체로 형성되는 과정에서 대단히 중요한 역할을 한다. 또 다른 특징은 내부의 고압유체에 대한 누수방지 및 안전성에 대한 배려를 하였으며, 이를 위해 push rod와 cast rod 사이에 테프론을 끼어 넣었다. 실험중에 테프론은 상·하로부터의 압력과 상승된 온도에 의해 변형되어 내부에서 발생하는 고온증기의 누설을 방지시켜 고화반응중의 시료를 수열상태로 유지시키는 역할을 한다.<sup>(3,4)</sup>

### 2.2 고화체 합성

본 연구에서 사용된 암석폐재는 각섬석 폐재로서 입도가 90~106 μm인 암석분말을 시료로 선택하였으며, Table 1은 각섬석 폐재의 화학적 조성을 보인 것이다.

실험은 무게 250 g의 암석분말에 NaOH용액(농도 : 10 ml/l) 25 cc(10 wt%)를 잘 섞어 장치에 제공되었다. NaOH용액을 선택하게 된 이유는 각섬

**Table 1** Chemical compositions(wt %)

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O
10.71	13.19	7.51	20.18	0.85	44.86	8.55	0.21	0.14	0.61	0.09	0.14

**Table 2** Mechanical characteristics of fibers used

Fiber Type	Length, L <sub>t</sub> (mm)	Diameter, D <sub>t</sub> (mm)	Aspect ratio (L <sub>t</sub> /D <sub>t</sub> )	Tensile strength	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Steel	2.862	0.12	23.85	4.17×10 <sup>3</sup> (MPa)	7.80
Carbon	3.02	0.042	71.2	0.23×10 <sup>3</sup> (GPa)	1.80

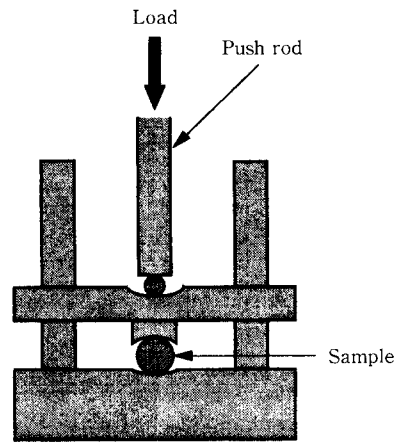
석이 초염기성 암석으로서 성분 중에 산화규소, 산화알루미늄, 산화나트륨 및 산화칼륨 등 알칼리성 원소가 많이 함유되어 있고, NaOH용액은 고온에서 이들 원소의 용해를 촉진시키기 때문이다.<sup>(4)</sup> 이상에서 만들어진 시료를 sample housing의 안쪽 압력관의 중앙에 위치하도록 한 후, 용량 100톤의 만능시험기를 이용하여 40 MPa까지 냉간압력(cold pressing)을 가하고 난 다음, 소정의 온도까지 온도를 상승시켰다. 온도를 올리는 과정이나, 유지시간동안에 일축압력 40 MPa이 반응시간동안 일정하게 유지되도록 하중제어실험을 실시하였다. 수열 온도는 온도상승속도를 9°C/min로 하여 250°C, 300°C 및 350°C에서 0.5시간, 1시간 및 2시간동안 유지시킨 다음, 서냉시킨 후, 약 100°C 부근에서 수열 Hot press 장치로부터 고화체를 빼내었다.

이상의 실험에서 얻어진 고화체를 대상으로 강도 실험을 실시하여 고화체 제조를 위한 최적조건을 찾아내었고, 이들 조건하에서 두 종류의 섬유를 혼합시켜 섬유강화형 고화체를 제조하였다. 사용된 섬유는 강섬유(SUS계)와 탄소섬유이며, 각각의 물성은 Table 2와 같다.

### 2.3 고화체의 강도실험

얻어진 원반상의 고화체를 에머리지 #800까지 연마를 실시한 다음, Fig. 2와 같은 장치에 의해 압열실험(Brazilian test)을 실시하였으며,<sup>(5)</sup> 실험시 cross head의 속도는 0.2 mm/min로 하였다. 구해진 파단하중(최대하중)을 식 (1)에 대입하여 강도  $\sigma_f$ 를 산출하였다.

$$\sigma_f = \frac{2P_{\max}}{\pi dt} \quad (1)$$

**Fig. 2** Brazilian test

여기서,  $P_{\max}$ 는 최대하중,  $d$ 는 시험편 직경,  $t$ 는 시험편 두께, 그리고  $\pi$ 는 원주율이다.

한편, 고화체의 고화기구와 미시적 파괴기구를 규명하기 위하여 파단된 시험편을 대상으로 SEM 관찰을 실시하였다.

### 2.4 고화체의 파괴인성실험

얻어진 원반상의 고화체로부터 Round Compact Tension(RCT) 시험편을 만들어 파괴인성실험을 실시하였다. RCT 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같다. 즉, 폭  $W=44$  mm, 초기균열  $a_0/W=0.5$ 로 하고 난 다음, 두께 0.15 mm의 카본-휠을 사용하여 최종균열을 내었다. 파괴인성시험은 Instron 만능시험기를 이용하였고, 시험시의 cross head의 속도는 0.2 mm/min으로 하였다.

파괴인성실험에 의해 얻어진 하중-변위(균열개구 변위)곡선으로부터 파괴에너지( $G_f$ )와 강도특성의

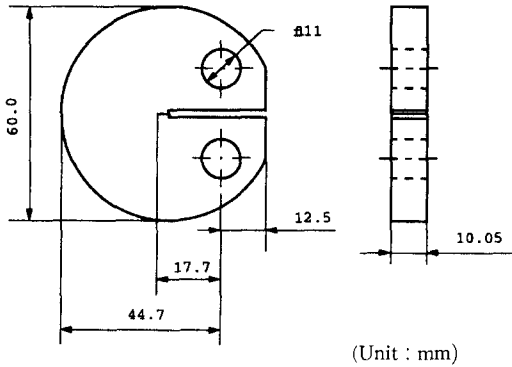


Fig. 3 Round compact tension specimen

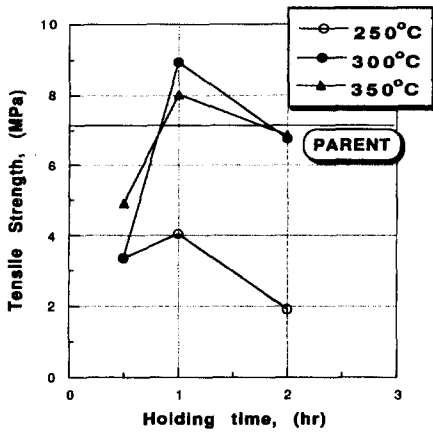


Fig. 4 Relationship between holding time and tensile strength of solidified rocks with 10wt% NaOH solution

최도인 노치강도( $\sigma_n$ )을 각각 구하였다. 파괴에너지는 식 (2)에서 보인 바와 같이 하중-변위곡선하의 면적을 ligament 면적으로 나눈 것으로 구하였다.<sup>(6)</sup>

$$G_f = \frac{A}{(W - a_0)B} \quad (2)$$

여기서,  $A$ 는 초기하중으로부터 최대하중의 30%에 해당하는 하중-변위하의 면적,  $W$ 는 시험편의 폭,  $a_0$ 는 초기균열길이, 그리고  $B$ 는 시험편의 두께이다.

노치강도  $\sigma_n$ 은 식 (3)에 의해 구하였다.<sup>(6)</sup>

$$\sigma_n = \frac{2P_{max}(2W + a_0)}{(W - a_0)^2 B} \quad (3)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 수열 실험조건이 고화체의 기계적 성질에 미치는 영향

Fig. 4는 유지시간이 0.5, 1 및 2시간에서 고화체의 수열온도와 강도와의 관계를 보인 것이다. 우선 유지시간이 1시간과 2시간에서 수열온도가 250°C에서 300°C로 높아짐에 따라 고화체의 강도는 증가하지만, 300°C에서 350°C로 더 높아짐에 따라 강도가 떨어지고 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 수열온도에 따라 고화체의 강도가 다르게 나타나고 있음은 물의 이온 적과 수열온도와의 관계와 관련시켜 볼 필요가 있다. 즉, 물의 이온 적은 밀폐된 공간에서 수열온도가 300°C에서 가장 많고, 용해 및 가수분해가 최대가 되며, 그 이상으로 온도가 높아짐에 따라 이들 성질이 감소한다고 하였다.<sup>(7)</sup> 이와 같은 사실을 근거로 하여 연구결과를 고찰하여 보기로 한다. 온도가 250°C로서 낮은 경우에는 분말을 구성하고 있는 각종 입자표면층의 반응층이 얇고, 원소들의 결합이 원활하지 못하기 때문에 고화체의 강도가 낮게 나타난 것으로 생각된다. 그러나 300°C로 높아짐에 따라 용해 및 가수분해현상이 활발하게 이루어지면서 반응층이 두꺼워지고, 각종 이온( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Si^{4+}$ ,  $Al^{3+}$  등)들이 입자의 표면에서 방출되며, NaOH용액도 고온상태에서  $OH^-$ 가 분해되어 나오게 된다.<sup>(7)</sup>  $OH^-$ 는 Si-O-Si 및 Al-O-Al의 결합을 쉽게 깨뜨리게 되고, 규산염이온이 용해되어 암석입자간의 결합이 활발하게 진행되기 때문에 재결정화가 보다 많이 이루어지게 될 것이며, 여기에 기계적인 압력을 받게 되기 때문에 입자간의 결합은 더욱 가속화되어 강도가 더 높아진 것으로 사료된다. 하지만 수열온도가 350°C로 높아지더라도 입자들의 용해반응 및 가수분해의 능력이 300°C에 비해 떨어지기 때문에 강도가 오히려 감소하는 것으로 판단된다. 그런데 유지시간이 0.5시간인 고화체는 상기와 같은 수열반응이 일어날 수 있는 시간적 여유가 불충분하기 때문에 반응온도가 350°C에서 가장 높은 강도 값을 보이는 것으로 생각된다.

고화체의 강도와 유지시간과의 관계를 살펴보면, 유지시간이 0.5시간에서 1시간으로 길어짐에 따라 강도는 현저히 증가하는 경향을 보이며, 유지시간이 1시간에서 2시간으로 더 길어짐에 따라 강도는

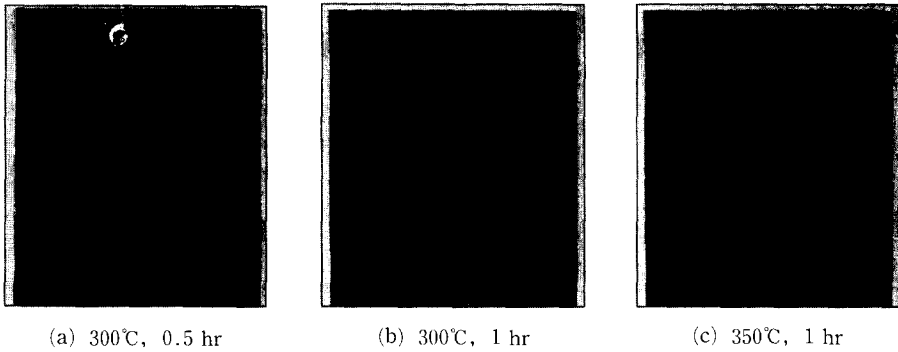


Fig. 5 SEM observation of the fractured surfaces at various experimental conditions

감소하고 있음을 볼 수 있다. 이는 유지시간이 길어짐에 따라 수열반응에 의해 생성된 제 2의 화합물이 고화체의 강도를 떨어뜨리는 결과를 초래한 것으로 생각된다. 이와 같은 결과는 화강암폐재를 대상으로 한 연구결과와 일치한다.<sup>(4)</sup> 여기서, 특히 할 만한 사실은 수열온도가 300°C와 350°C이고, 유지시간이 1시간과 2시간인 실험조건에서는 원석보다 높은 강도의 고화체가 얻어졌다는 점이다.

Fig. 5는 각각의 수열온도와 유지시간에 따른 고화체의 파단면을 보인 것이다. 수열온도가 300°C이고, 유지시간이 0.5시간인 경우, 파단면의 전반에 걸쳐 기공이 많이 존재하고 있음을 볼 수 있다. 이는 유지시간이 짧아서 기계적인 압착이 충분히 이루어지지 않았음을 의미하는 것으로서 입자간의 결합이 치밀하지 못하여 기공이 파면 전반에 걸쳐 존재하게 되고, 이러한 기공들이 고화체의 강도 저하를 초래하는 것으로 사료된다. 고화체의 강도가 원석에 비해 크게 나타난 300°C, 1시간 및 350°C, 1시간인 경우의 파단면을 살펴보면, 0.5시간인 경우와는 다르게 파면 전반에 걸쳐 기공의 양이 현저히 줄어 있음을 확인할 수 있다. 그러나 어떠한 경우를 막론하고 기공의 존재는 피할 수 없다는 점이다. 왜냐하면, 암석을 구성하고 있는 입자들이 완전히 용해된 상태에서 고화되는 것이 아니라, 구성원소의 일부분의 표면만이 용해된 상태에서 기계적인 압착에 의해 암석 입자간이 결합되기 때문이다.

이상의 결과에서 치밀하게 잘 다져진 고화체는 강도가 크게 나타났으며, 각섬석 폐재의 고화체 합성을 위한 최적조건은 수열온도가 300°C이고, 유지시간이 1시간이었다.

### 3.2 단섬유 복합체의 파괴거동

Fig. 6은 각섬석 폐재의 고화를 위한 최적실험조건(온도 : 300°C, 유지시간 : 1시간)에서 제조한 섬유로 강화된 고화체와 섬유를 첨가하지 않은 보통재의 하중-균열개구변위 선도이다. 우선, 강섬유를 첨가한 고화체의 경우, 섬유의 체적함유율이 1%, 3%, 5%로 많아짐에 따라 보통재에 비해 최대하중이 크게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 또한 보통재는 최대하중에서 변위가 거의 없는 상태에서 갑작스런 파괴를 보이지만, 강섬유를 첨가시킨 고화체는 최대하중을 넘어선 영역에서도 안정적인 파괴의 양상을 보였다. 탄소섬유를 혼입시킨 고화체의 경우에도 보통재에 비해 최대하중이 증가하였으며, 변위도 다소 증가하여 보통재에 비해 다소 안정적인 파괴를 보였으며, 하중-변위곡선상의 면적도 보다 크게 나타났다. 그러나 탄소섬유를 3%로 혼입량을 많게 했을 경우에는 후술한 것처럼 실험이 불가능하여 본 그래프상에 나타낼 수 없었다.

이상의 결과로부터 암석폐재에 섬유를 혼입시켜 수열 Hot press법에 의해 섬유강화 고화체를 형성할 경우, 강도와 인성을 향상시키는데에는 탄소섬유보다 강섬유가 유효하다는 것을 알 수 있다. 이와같은 사실을 정량적으로 평가하여 보기 위하여 섬유와 기지(matrix)와의 계면사이의 전단강도를 구하여 비교하여 보기로 한다. 계면사이의 전단강도는 파괴인성실험을 실시할 때, 단섬유가 기지로부터 뽑히는 상태에서 발생하는 강도로서 다음 식에 의해 구해진다.<sup>(6)</sup>

$$\tau = \frac{12G_f}{gVd(L/d)^2} \quad (4)$$

여기서,  $G_f$ 는 파괴에너지,  $V$ 는 섬유의 체적함유

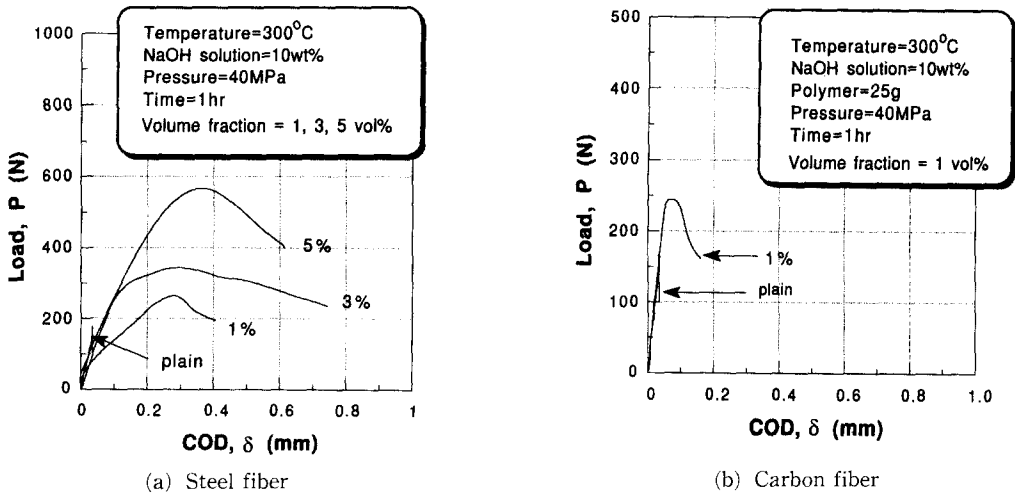


Fig. 6 Load vs displacement curve for RCT specimens

Table 3 Shear strength between matrix and fibers

Pressure	Specimen	NaOH (wt%)	Fiber (Volume fraction)	Temp.	Holding time	Shear strength (MPa)
40 MPa	Rock powder (250 g) (90~106 μm)	10%	Steel 1%	300°C	1 hr	3.01
			Steel 3%	300°C	1 hr	4.51
			Steel 5%	300°C	1 hr	3.39
			Carbon 1%	300°C	1 hr	1.91

량,  $L$ 는 섬유 길이,  $d$ 는 섬유 직경, 그리고  $g$ 는 섬유의 Bridge에 수반하는 snapping의 정도를 나타내는 계수로서 모재의 균열 내에서의 섬유굴곡 부에서 마찰계수를  $f$ 라고 한다면, 다음 식으로 표시된다.

$$g = \frac{2(1 + e^{(\pi f/2)})}{(4 + f^2)} \quad (5)$$

문제를 간단히 하기 위해서 snapping효과가 없는 것으로 가정하면,  $f$ 값은 0으로 되기 때문에  $g$  값을 1로 하여 계면사이의 전단강도를 계산하였다.

이상의 방법에 의해 얻어진 계면강도를 요약한 것이 Table 3이다. 표에서 볼 수 있는 것은 모든 조건에서 강섬유의 계면강도의 값이 탄소섬유에 비해 1.5~2.3배 큰 값을 보임으로써 강섬유가 탄소섬유보다 고인화에 보다 유효하다는 예측을 가능하게 한다.

### 3.2 단섬유 복합체의 파괴인성과 노치강도 특성

Fig. 7은 암석의 고화체에 섬유를 혼입시킨 경우의 섬유첨가량과 파괴에너지와의 관계를 보인 것이다. 강섬유의 체적함유량을 1%, 3%, 5%로 증가 시킴에 따라 파괴에너지는 보다 큰 값을 보이고 있다. 中根에 의하면,<sup>(6)</sup> 콘크리트 폐재에 강섬유를 혼입시켰을 때 2%까지는 파괴에너지가 증가하지만, 3%이상 혼입시킨 강섬유 복합체의 경우에는 오히려 감소한다고 하였다. 그 이유로서 섬유의 길이가 12 mm로서 길고, 섬유가 다발(fiber bole)로 존재하기 때문에 모재와 불균일한 분산이 이루어지고, 섬유 등이 겹치는 부분이 결함으로 작용하기 때문에 파괴에너지가 감소한다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 섬유의 길이가 2.86 mm로서 현저히 작아서 강섬유가 기지내에서 다발(fiber bole)로 존재하지 않기 때문에 상기의 연구결과와는 다르게 섬유의 혼입량을 5%까지 늘려도 파괴에너지는 증

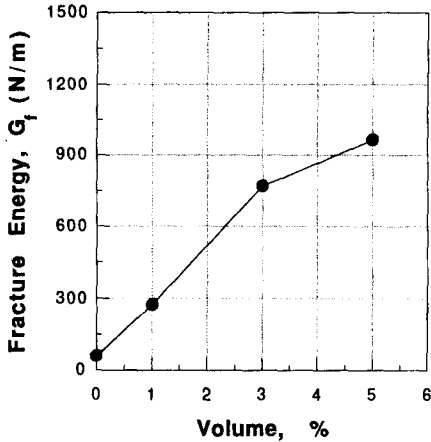
가하는 것으로 생각된다. 이와 같은 결과는 섬유에 aspect ratio(섬유의 길이/섬유의 직경)가 파괴에너지에 큰 영향을 미칠 것이라고 하는 점을 시사해 주고 있다.

강섬유를 혼입시켰을 때, 고화체의 인성이 개선되고 있음은 Bridge효과와 균열의 진전경로의 복잡성에 기인하는 것으로 생각된다.<sup>(8)</sup> Fig. 8은 Bridge기구를 설명하기 위해 고화체 내부에서 섬유의 효과를 모식적으로 나타낸 것이다. 섬유가 크랙을 Bridge할 경우, 섬유에 의해 크랙을 단계하는 응력의 합을  $\sigma^p(x)$ 라고 한다면, 그림 (b)에서와 같이  $\sigma^p(x)$ 에 의해 균열의 진전을 어렵게 한

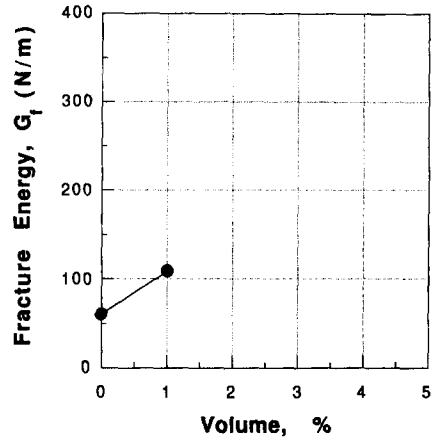
다. 이때, 복합재료의 응력확대계수  $K_c$ 는 응력확대계수의 중첩의 원리(superposition principle)에 의해 다음 식으로 표현된다.

$$K_c = K_\infty - \Delta K^c (\Delta K^c \geq 0) \tag{6}$$

윗 식에서  $\Delta K^c$ 가 0이라는 것은 그림 (a)에서와 같이 섬유에 의해 크랙을 단계하는 응력인  $\sigma^p(x)$ 가 발생하지 않음을 의미하며,  $K_\infty$ 는 실제로 측정되는 응력확대계수이고,  $\Delta K^c$ 는  $\sigma^p(x)$ 의 존재에 의해 크랙선단에서의 응력확대계수의 저하분이다. 크랙 Bridge가 발생하여  $\sigma^p(x)$ 가 커지면  $\Delta K^c$ 가 크게 되고, 그 결과 고인화가 이루어지는 것이다.



(a) Steel fiber



(b) Carbon fiber

Fig. 7 Relations of fracture energy and volume fraction for carbon fiber (300°C, 1 hr)

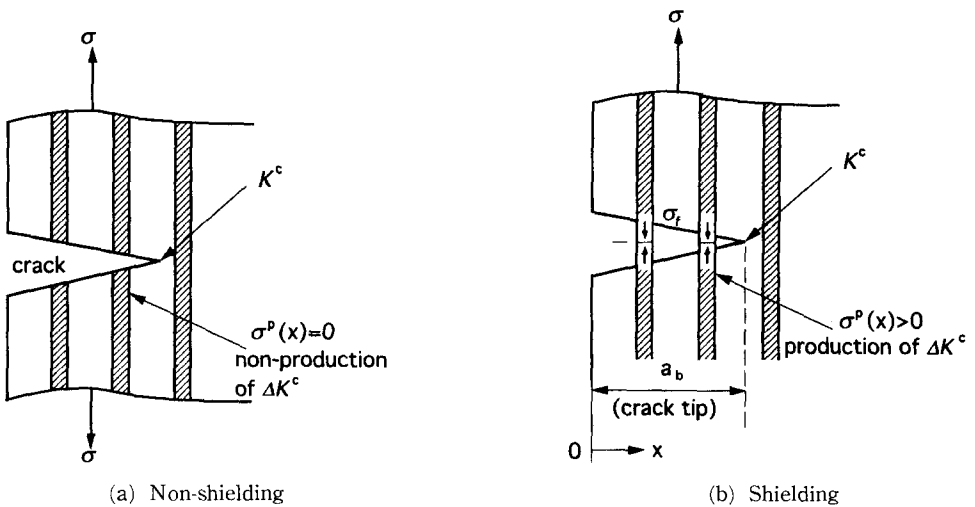
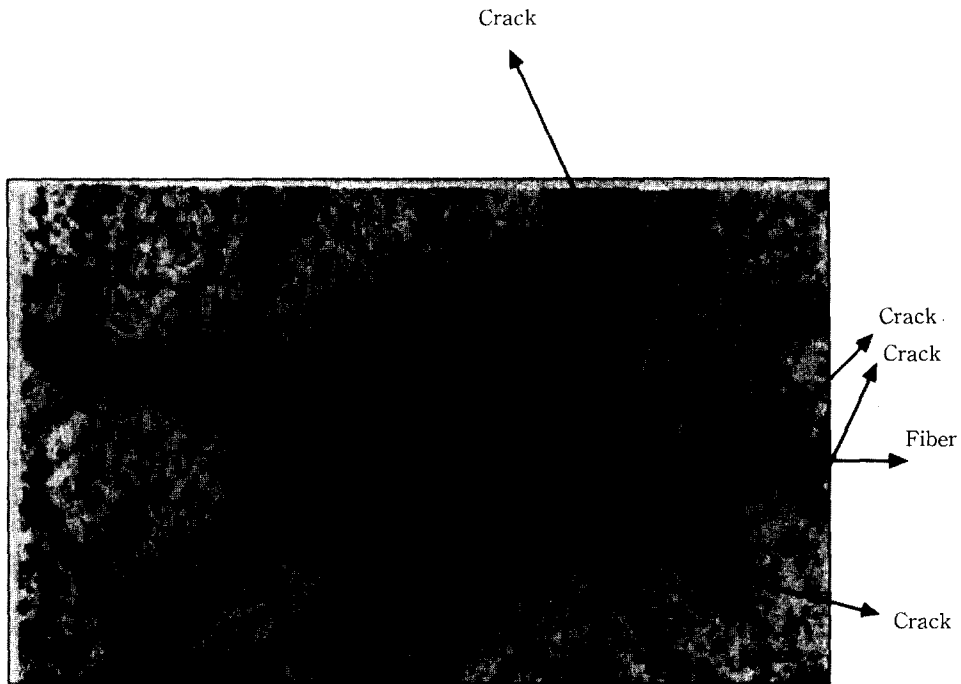


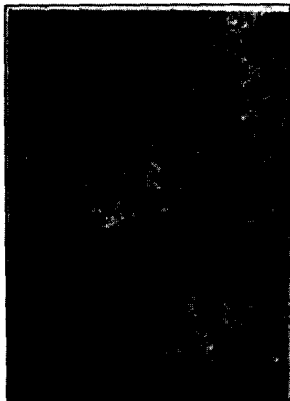
Fig. 8 Mechanism of Bridge's effect

이와 같은 bridge효과는 크랙의 생성까지에 해당하는 것이라고 볼 수 있지만, 일단 균열이 발생하여 진전해 나가는 과정에서도 Fig. 9에서 볼 수 있는 것처럼 섬유는 균열이 진전해 나가는 방향에 대해 수직으로 위치하여 균열의 열림(opening)을 방해하게 한다. 또한 균열은 혼입된 섬유로 인하여 불

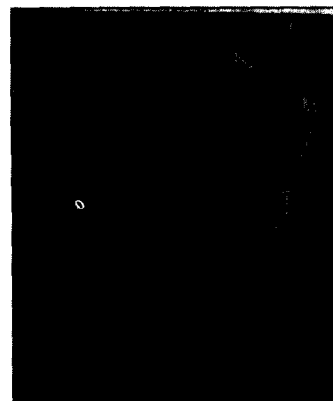
규칙한 양상으로 진전하게 됨에 따라 균열선단에서 다중균열(multiple cracking) 및 균열갈림(crack branching)현상이 발생하여 균열을 진전시키는데 필요한 구동력인 응력확대계수가 분산되게 되며, 그 결과, 주균열을 진전시키는데 보다 많은 에너지가 필요하게 되어 인성이 개선되는 효과가 있는 것



(a) Bridge effect (3%)



(1%)



(3%)

(b) Pull out

Fig. 9 SEM observation of the RCT specimens with 1, and 3 vol% steel fiber



으로 사료된다. 본 연구에서는 하중-변위선도상에서 하중이 최대하중에서 균열이 발생한다고 가정했을 때, 섬유를 혼입시킨 고화체의 고인화는 크릭 Bridge효과에 비해 균열전경로의 복잡성에 의해 이루어지는 것이 지배적이라고 생각한다. 왜냐하면, 앞선 하중-변위선도에서 에너지를 구할 때 최대하중까지에 해당하는 면적이 전체 면적에 비교하여 대단히 작기 때문이다.

한편, 탄소섬유를 혼입시킨 고화체의 경우에는 체적함유율이 1%까지 보통재에 비해 파괴에너지가 증가하였다. 그러나 3%인 경우에는 파괴에너지를 구할 수 없었다. 왜냐하면, 본 연구에서 사용된 bundle형태의 섬유와 암석폐재가 잘 혼합되지 않아서 탄소섬유의 체적함유량이 많아질수록 만족스러운 고화체를 얻기가 불가능하기 때문이다. 그 결과, RCT형태의 시험편을 제작하여 파괴인성실험을 실시하였을 때, pin point하중이 가해지는 부분이 먼저 파괴되는 현상이 발생하여 파괴에너지를 구할 수 없었다.

한편, 강섬유와 탄소섬유와의 결과를 비교하여 보면, 1%의 체적함유량에서 강섬유의 경우가 탄소섬유에 비해 파괴에너지가 크다는 것을 알 수 있다. 이는 강섬유인 경우, Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 기지와 섬유의 계면사이의 전단강도가 탄소섬유에 비해 크기 때문에 보다 강한 pull-out 형태의 기구가 존재하기 때문이라고 사료된다.

Fig. 10은 강 및 탄소섬유를 혼입시킨 섬유복합체 및 보통재에 대해 파괴에너지와 노치강도와의 관계를 보인 것이다. 그림으로부터 섬유강화된 고화체는 보통재보다 파괴에너지가 1,580%, 노치강도는 최고 320% 이상까지 증가하였으며, 강섬유인 경우가 탄소섬유에 비해 파괴강도 및 파괴에너지가 높다는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 사실로부터 강섬유는 섬유자체의 강도가 높고, 섬유가 파단되지 않은 채 기지로부터 빠져나오는 현상에 의해 파괴에너지가 높게 되며, 계면전단강도도 높은 값을 가지고 있고, Bridge효과가 충분히 있기 때문에 노치강도도 큰 값을 보인다. 이상의 결과로부터 섬유를 혼입시킨 고화체의 강도와 파괴에너지는 강섬유가 탄소섬유에 비해 보다 크기 때문에 수열법에 의해 섬유강화 고화체를 얻는데는 강섬유를 혼입시키는 것이 효과적이라고 할 수 있다.

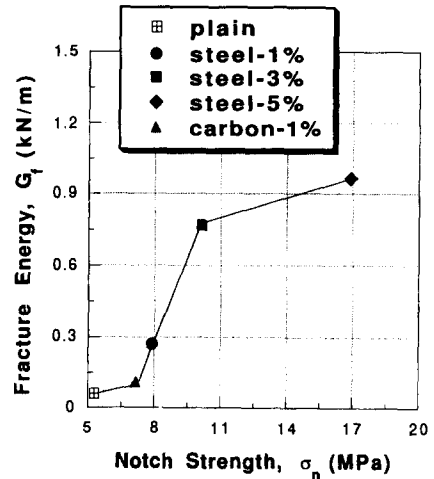


Fig. 10 Notch strength vs fracture energy of fiber reinforced solidified bodies at 300°C, 1hr

#### 4. 결 론

각섬석 폐기물을 각각의 실험조건에서 수열 Hot press법에 의해 고화체를 합성하였으며, 고화체 합성을 위한 최적조건을 찾아내었다. 이어 암석폐재에 두 종류의 섬유를 혼입시켜 섬유로 강화된 고화체를 제조하였다. 얻어진 원반형의 고화체에서 RCT형태의 시험편을 제작하여 파괴인성실험을 실시하였고, 미시적 파괴거동을 고찰하기 위하여 파단된 면을 미시적으로 관찰하였다.

이상의 실험에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 고화체의 강도는 수열 실험조건에 따라 각기 다르게 나타났으며, 수열온도가 300°C, 유지시간이 1시간인 조건에서 강도가 가장 큰 고화체를 얻을 수 있었다. 또한, 고화체의 강도는 파단면에 존재하는 기공(blow hole)의 정도에 의존성이 있었다.

(2) 강섬유를 혼입시킨 고화체의 최대하중은 보통재에 비해 최대하중이 현저히 증가하였으며, 섬유의 체적함유율이 많아짐에 따라 최대하중 이상의 범위에서도 보다 안정적인 파괴양상을 보였으며, 탄소섬유를 혼입시킨 고화체도 보통재에 비해 최대하중이 증가하였다. 또한 계면사이의 전단강도는 강섬유의 복합체가 탄소섬유를 함유하고 있는 고화체보다 더 큰 값을 보였다.

(3) 강섬유를 혼입시킨 고화체의 파괴에너지는 섬유의 체적함유율에 비례하여 증가하였으며, 이는

섬유와 기지사이의 강한 결합력, Bridge효과, 다중균열(multiple cracking) 및 균열갈림(crack branching) 현상 등에 기인한다.

(4) 섬유를 혼입시킨 고화체의 노치강도와 파괴 에너지는 강섬유의 경우가 탄소섬유에 비해 크기 때문에 수열 Hot press법에 의해 고인화된 섬유강화 고화체를 얻는데는 강섬유를 혼입시키는 것이 보다 효과적이라고 할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구 조성비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Liu, V. C. and Leung, C. K. Y., 1992, "Theory of Steady State and Multiple Cracking of Random Discontinuous Fiber Reinforced Brittle Matrix Composite," *ASCE-J, Engineering Mechanics*, Vol. 3, pp. 234~239.
- (2) Liu, V. C., 1992, "Posy-crack Scaling Relations for Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Journal of Materials, Civil Eng.*, pp. 145~154.
- (3) 나의균, 정세희, 高橋秀明, 1995, "수열 Hot Press법에 의한 화강암 폐재의 고화체 합성 및 평가기술에 관한 연구," 한국재료학회지, 제5권, 제3호, pp. 288~296.
- (4) 나의균, 橋田俊之, 1996, "수열 Hot Press법에 의한 화강암 폐재의 고화체 형성과 AE특성 평가에 관한 연구," 한국재료학회지, 제6권, 제3호, pp. 242~252.
- (5) 高橋秀明, 1994, "短纖維強化マイクロメカニクスモデルによる超高靱性セラミックス係複合材料設計, 製造, 評價に關する研究," 研究成果報告書, 東北大學工學部 附屬破壊力學應用研究施設.
- (6) 中根裕司, 1994, "水熱ホットプレスによる法コンクリト廢材の固化體合成及び評價技術の開発に關する研究," 修士學位論文, 東北大學 大學院.
- (7) Smith, F. G., 1963, *Physical Chemistry*, Addition-Wesleypp, 335~336.
- (8) 香川 豊, 八田博志, セラミックス基 複合材料, pp. 166~168.